Aus dem
RÖNTGENINSTITUT DER UNIVERSITÄT BERN
(Direktor Prof. Dr. Ad. Liechti)
Arbeit unter der Leitung von Dr. W. Minder

Untersuchungen über die Wirkung der Beta- und Gammastrahlen auf das Wachstum von Bohnenkeimlingen

INAUGURAL-DISSERTATION
der Medizinischen Fakultät der Universität Bern
zur Erlangung der Doktorwürde
vorgelegt von

JOSEF ARNOLD
aus Schlierbach, Luzern

1944 BUCHDRUCKEREI KELLER & CO. AG., LUZERN

Auf Antrag des Herrn Prof. Dr. Ad. Liechti zum Druck als Dissertation genehmigt.

Bern, den 26. Januar 1944.

Der Dekan:
Prof. Dr. E. Glanzmann

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Untersuchungen über die Wirkung der Beta- und Gammastrahlen auf das Wachstum von Bohnenkeimlingen

I. Vorgeschichte

Untersuchungen der Strahlenwirkungen auf biologische Objekte wurden früh schon von C. Körnike und seinem Mitarbeiter *H. Iven* [4]) durchgeführt. Letzterer vor allem hat mit mehreren Objekten Versuche angestellt; es erwiesen sich die Schmetterlingsblütler, insbesonders die Pferdebohne (Vicia faba equina), als geeignetes Untersuchungsobjekt wegen ihrer hohen Strahlungsempfindlichkeit. Ihm gelang es mit einwandfreien Meßgeräten (Ionisationskammer und Elektrometer), die benutzten Strahlungsintensitäten, bzw. die Dosen von Röntgenstrahlen, auf biologische Objekte genau zu messen und so die wachstumfördernden bzw. wachstumhemmenden Dosen anzugeben. In seinen ausgedehnten Versuchen fand er, indem er vor allem Keimung und Wachstum kontrollierte, daß alle Röntgeneffekte erst nach Ablauf einer gewissen *Latenzzeit* auftraten, und daß alle Strahlenqualitäten bei geringen Dosen wachstumbeschleunigend wirkten, in stärkeren Dosen hemmend, und zwar war der Grad der Hemmung proportional der angewendeten Dosis. Als erstes Ergebnis seiner Arbeiten fand der Satz von *C. Körnike* seine Bestätigung: „Je reger die Lebenserscheinungen in einem Organismus vonstatten gehen, umso stärker und umso eher macht sich der Einfluß der Bestrahlung bemerkbar". Als weitere Erkenntnis fand er eine intensivere Wirkung bei ungefilterten weichen Strahlen als bei gefilterten Strahlen.

Besonderes Interesse haben die von *R. Kirschner* [5]) gemachten Experimente an Blattläusen. Seine Versuche ergaben Fertilitätshemmungen durch Radiumbestrahlung, die in der I. Nachkommen-

generation bestrahlter Muttertiere am schwächsten, in der II. am stärksten zum Ausdruck kamen. Ferner fand er, daß geringe Mengen von Radium auf die Größe und die Geschlechtsreife der Versuchstiere eine stimulierende Wirkung ausüben. Seine Resultate zeigen, daß die Wirkung der Radiumstrahlen eine langanhaltende ist, und daß von ihnen nicht nur die I. Generation, sondern auch noch die zwei nachfolgenden Generationen betroffen werden.

Für *H. Holthusen* [1]) haben die Radiumstrahlen kaum eine andere Wirkung als die Röntgenstrahlen, das soll aber nicht heißen, daß jene von diesen vollständig ersetzt werden können. Er spricht sich im Gegenteil besonders bei der Anwendung in der humanen Therapie für eine Kombination beider Strahlenarten aus.

Durch strahlenbiologische Versuche an Drosophilapuppen kamen *A. Liechti*, *W. Minder* und *J. H. Müller* [2]) zu dem wichtigen Ergebnis, daß die Wirkungsweise der Röntgenstrahlen gegenüber den Gammastrahlen, besonders was die Trefferzahlen für die einfache Wahrscheinlichkeitsbetrachtung anbelangt, recht stark voneinander abweicht.

Wie *P. Zacharias* [6]) nachwies, scheint die diskontinuierliche, rhythmisch-fraktionierte Bestrahlung für Vicia faba equina besser verträglich zu sein, als die kontinuierliche, vorausgesetzt, daß beide Anwendungsformen sich über gleiche Zeiten erstrecken.

Nach *A. Salzmann* [8]) erwiesen sich Röntgenstrahlenmengen von 12,5—25 r wachstumfördernd, solche von 50 r zeigten kaum eine Abweichung gegenüber den Kontrollpflanzen. Erst Dosen von über 100 r wirkten in höherem Grade wachstumhemmend.

II. Einleitung

Im Anschluß an die von *A. Salzmann* gemachten Versuche mit Röntgenstrahlen sollen hier die Wirkungen der Beta- und Gammastrahlen auf dasselbe Objekt näher untersucht werden, um ihr Verhalten im Vergleich mit Röntgenstrahlen zu prüfen. Weiter ist es interessant festzustellen, wie sich die wachstumfördernden und die wachstumhemmenden Dosen der Radiumstrahlen gegenüber den entsprechenden Mengen der Röntgenstrahlen verhalten.

Das Objekt und die Bestrahlungsmethode, die wir wählten, kommen den Forderungen nach, die man nach *H. Holthusen* [1]) an Testobjekte und Methoden stellen muß:

1. Die Reaktion des Objektes ist der Messung leicht zugänglich. Die Messung kann durch die dünnen, gut durchsichtigen Akkumulatorengläser leicht vorgenommen werden.

2. Die Verschiedenheit im Wachstum der Keime sollte durch eine genügend große Anzahl von Bohnen ausgeglichen werden.

Auf dem Gebiete des Strahleneinflusses auf biologische Objekte ist man mit *H. Holthusen* [1]) allgemein zu folgender Auffassung gelangt: Das Gesetz von der Konstanz des Intensitätszeitproduktes der Strahlen (Gesetz von Bunsen und Roscae) bei einfachen photochemischen Reaktionen pflegte man früher ohne weiteres allgemein auch auf radio-chemische Reaktionen im Röntgen- und Radiumgebiet zu übertragen. Die Erfahrung hat aber gezeigt, daß es für Strahlenreaktionen in der lebenden Zelle keine unumschränkte Gültigkeit hat. Im lebenden Gewebe stellt eine Bestrahlung einen Reiz dar, der durch Gegenreaktionen beantwortet wird, welche den ursprünglichen Zustand wieder herzustellen suchen (Schwarzschild'sches Gesetz).

Heute stellt man sich die Strahlenwirkung in einer Zelle als mehrere zeitlich nacheinander ablaufende Vorgänge vor. Der primäre Strahlungseffekt dürfte in einer Ionisation der organischen und anorganischen Bestandteile der Zelle bestehen. Beim Auftreffen der Strahlen auf ein biologisches Objekt treten sie mit der Materie zum Teil in Wechselbeziehung. Mit Absorptions- und Streuprozessen ist die Bildung von Sekundärelektronen verbunden. Dadurch werden die Moleküle ionisiert und der ganze Zellinhalt wohl chemisch reaktionsfähiger. Somit dürfte das Ausmaß der Strahlenwirkung von Geschwindigkeit und Anzahl der Sekundärelektronen abhängig sein. Da ein Ionisationsvorgang wieder rückgängig gemacht wird, wenn die ihn auslösende Energie aufhört zu wirken, so kann man annehmen, daß dieser biologische Primärvorgang für kleine Dosen reversibel ist.

Als weitere sinnfällige Wirkung der Strahlung beobachtet man eine Hemmung im Wachstum, die aber erst dann auftritt, wenn die Strahlen in großen Dosen auf das biologische Objekt einwirken, so, daß die wachstumhemmenden Reaktionen im bestrahlten Gewebe

soweit überwiegen, daß sie nicht mehr rückgängig gemacht werden können, also irreversibel geworden sind.

Wenn also grundsätzlich eine diphasische Wirkung der kurzwelligen Strahlen erklärt werden kann, so wird sie doch bei einfachen und deshalb eindeutigen Experimenten sehr wenig beobachtet. Im Gegenteil sind wir gewohnt zu sehen, daß die Strahlenwirkung unabhängig von der Größe der Dosis stets nur in einer Richtung verläuft. Es handelt sich dann wohl fast ohne Ausnahme um Schädigungen. Ich spreche von einfachen und übersichtlichen Versuchsanordnungen mit einfachen Objekten.

Es liegt in der Natur der Sache, daß im Gegensatz dazu bei komplexen Objekten (Gewebe oder ganze höhere Tiere oder sogar pathologische Zustände bei solchen) unter Umständen Wirkungen beobachtet werden können, die eine Reizung oder Förderung etwa einer Funktion dadurch vortäuschen, daß eine Hemmung beseitigt wird. Man spricht dann von einer „Reizwirkung" oder von „Reizdosen". Da, wo diese Bezeichnung Verwendung findet, ist sie insofern falsch angewendet, als dort ein Wachstumsreiz mit aller Wahrscheinlichkeit nicht in Frage kommt (Reizbestrahlung bei Amenorrhoe, bei Agranulozytosen und Anaemien).

Umso interessanter ist die Tatsache, daß es biologische Objekte gibt, die tatsächlich durch kleine Strahlendosen im Wachstum gefördert, durch große Mengen dagegen gehemmt werden.

Ein solches Objekt ist die in unserem Versuche verwendete Pferdebohne.

III. Experimentelles

Die Auslese und die Züchtungsmethode zur Gewinnung eines optimalen Ausgangsmaterials für unsere Untersuchungen waren prinzipiell die gleichen wie sie *R. Glocker*, *F. Hayer* und *O. Jüngling* [3]) angegeben haben. Dadurch sollen Fehlerquellen, die in biologischen Faktoren zu suchen sind, nach Möglichkeit ausgeschaltet werden. Um zu erreichen, daß jeder im Versuch benutzte Keimling, der in sich schon eine Summe von strahlenempfindlichen Einzelzellen darstellt, für die Strahlen gleich empfindlich sei, müssen alle Bohnen unter gleichen Bedingungen vorbehandelt und zur Keimung gebracht werden.

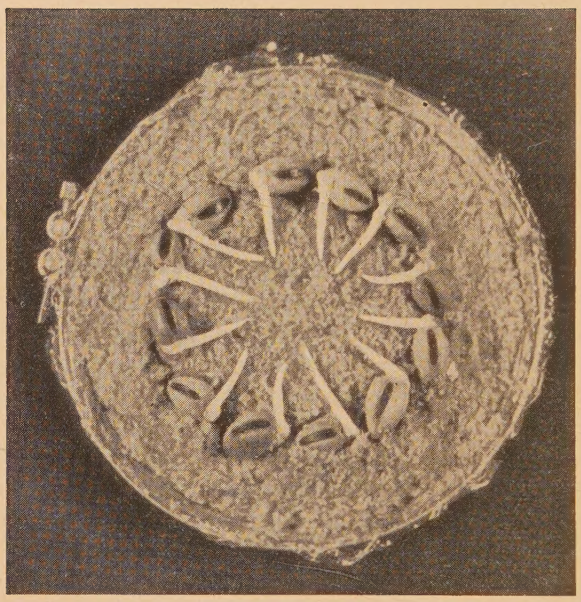
Die Auslese geschah dadurch, daß alle geschädigten Samen, die durch Parasiten, durch Fäulnis in Form von dunklen Flecken, oder durch mechanische Schädigung verändert waren, ausgeschieden wurden. Ferner war darauf geachtet worden, daß nur mittelgroße Exemplare mit glatter Hülse verwendet wurden, und daß alle mit dunkelbraunem und geschrumpftem Aussehen wegen zu starker Austrocknung nicht einbezogen wurden.

Zur Vorbehandlung wurden etwas mehr als das Doppelte der für die Bestrahlung notwendigen Samen während 24 Stunden in Leitungswasser gequollen, darnach auf eine angefeuchtete etwa 4 cm dicke Sägemehlschicht in Schalen eingelegt und so über 72 Stunden der Keimung überlassen. Um dieses Wachstumsmilieu der jungen Keimlinge vor Austrocknung zu schützen, wurden die Schalen mit vier Lagen feuchtem Fließpapier zugedeckt und jeden Tag von neuem angefeuchtet. Während der ganzen Keimungszeit durften im Aufbewahrungsraum kein direktes Tageslicht und keine Temperaturschwankungen zugelassen werden. Die Raumtemperatur betrug 22° C. Am 4. Tage waren dann die Keimlinge so lang gewachsen, daß sie nun zur Bestrahlung ausgelesen werden konnten. Bei der Auslese war die Länge des Wurzelkeimes maßgebend; sie betrug im Mittel 1—3 cm. Um möglichst gleiche Bestrahlungsobjekte zu erhalten, durfte der Längenunterschied der verwendeten Wurzelkeimlinge nicht mehr als 50% betragen; bei unserer Auswahl schwankte er zwischen 16 und 28 mm.

Zum eigentlichen Versuche wurden die ausgelesenen Exemplare in sechs Gruppen zu je 12 Bohnen zusammengestellt, *eine* Gruppe diente als Kontrolle, die andern wurden sukzessive mit verschiedenen Strahlenmengen bestrahlt. Die Versuchsanordnung war von *W. Minder* [7]) ausgearbeitet worden und soll hier des Näheren erörtert werden.

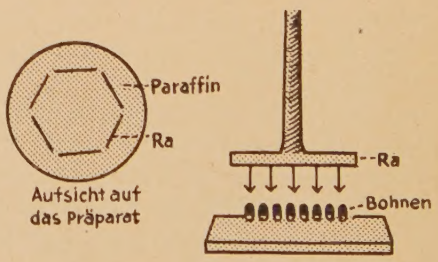
Zur Orientierung mögen das umstehende Bild und die folgenden Skizzen dienen.

Auf einem mit Cellophan bespannten Stickrahmen wurde feuchtes Sägemehl in einer Schicht von 2 cm aufgefüllt, in das 12 Bohnen auf einem Kreis eingesteckt wurden, und zwar so, daß ihre Wurzelspitzen radiär unter den Strahlenkegel zu liegen kamen. Da nicht die ganze Wurzel, sondern nur die eigentlichen Wachstumszentren in der Spitze



der Strahlung ausgesetzt werden sollten, so mußten sämtliche Wurzelspitzen innerhalb eines Kreises von 4 cm Durchmesser liegen, um in den homogenen Wirkungsbereich des Strahlenkegels zu kommen.

Zur Bestrahlung wurde ein besonders konstruierter Radiumträger verwendet. In einer offenen Blechschachtel, die mit Paraffin ausgegossen war, waren auf einem regulären Sechseck 6 Präparate Ra-Element à 10 mgr, insgesamt 60 mgr, angeordnet. Die Anordnung im regulären Sechseck kommt der Kreisform am nächsten, so daß sie in erster Annäherung als Kreis angenommen werden darf. In unserem Fall war der Radius r des Kreises 2 cm. Nebenstehende Skizze soll die Anordnung näher erläutern.



Um eine gleichmäßige, optimale Wirkung der Strahlen auf die Keimlinge zu erhalten, mußte darauf geachtet werden, daß der Abstand von der Ebene, auf der die Wurzelspitzen lagen, zu den Radiumpräparaten immer konstant gehalten wurde. In unserem Versuche war er 2 cm. Nach Berechnungen von *W. Minder* [7]) kann die Strahlung einer Kreislinie angegeben werden als Summe der Dosen der einzelnen Punkte dieser Kreislinie. Die Dosis D, die ein solcher Kreis liefert, beträgt

$$D = \frac{K\,M}{\sqrt{(r^2 + d^2 + h^2) - 4r^2d^2}}$$

Dabei bedeuten:

M = Radiummenge
K = Dosiskonstante
r = Radius des Kreises
d = Abstand des betrachteten Punktes vom Zentrum
h = Normaldistanz zwischen Strahlungskörper und Objekt.

Die mit Hilfe dieser Formel errechnete β-Strahlendosis betrug:

D = 500 r/h oder
D = 8,3 r/min.

Dasselbe Radiumpräparat wurde auch zur Erzeugung der γ-Strahlen verwendet. Die Ra-Präparate wurden zu diesem Zwecke mit 1,0 mm Pt gefiltert. Der Strahlenkegel wirkte durch eine 4 mm dicke Platte aus Bakelit auf das Objekt. Auf diese Weise erreichten wir, daß die korpuskulären β-Strahlen durch das Filter eliminiert wurden, so daß nur noch die γ-Strahlen zur Wirkung gelangten und Gleichgewicht zwischen r-Messung und sekundärer Elektronenproduktion bestand. Die Platte wurde auf die in Sägemehl eingesteckten Bohnen gelegt, ohne deren Wurzelkeime durch Druck zu schädigen. Im weiteren war die Anordnung dieselbe wie oben.

In unserem Versuche bestrahlten wir die erste Reihe zu 10 Serien mit β-Strahlen. Jede Serie enthielt 72 Bohnen; davon dienten 12 als Kontrollpflanzen, die übrigen wurden bestrahlt. Mit einer Intensität von 8,3 r/min. mußten wir zur Erreichung der verschiedenen Dosen verschieden lange Bestrahlungszeiten anwenden:

Für	5 r	36 Sek.			
„	10 r	1 Min.	12	Sek.	
„	25 r	3	„		
„	60 r	7	„	12	„
„	120 r	14	„	24	„

In der zweiten Reihe zu 6 Serien wurden in entsprechender Weise die γ-Strahlen einer Prüfung unterzogen. Da die γ-Strahlung nur einen Bruchteil der β-Strahlung ausmacht, sahen wir uns genötigt, die Strahlungszeiten entsprechend zu verlängern, und zwar wurden folgende Dosen und Zeiten angewendet, bei einer Intensität von 0,423 r/min.:

Für	9 r	21 Min.			
„	18 r	42	„		
„	36 r	1 Std.	24	Min.	
„	60 r	2	„	19	„
„	100 r	3	„	54	„

In allen Versuchen wurden die Wurzelspitzen während der Bestrahlung mit einem feuchten Filtrierpapier vor dem Austrocknen geschützt. Ferner war es angezeigt, die Bestrahlung stets zur selben Zeit durchzuführen, um tagesperiodische Schwankungen im Wachstum zu umgehen.

Beide Versuchsreihen mußten mit einer erheblichen Anzahl von Bohnen durchgeführt werden, um aus vielen Einzelwerten zu einem sichern Durchschnittswert zu gelangen. Die Bestrahlung der einzelnen Gruppen wurde stets ohne Unterbruch durchgeführt.

Als Wachstumsmilieu wurde dasselbe gewählt wie bei *A. Salzmann* [8]), um vergleichende Betrachtungen zwischen der Wirkung der Röntgen- und Radiumstrahlen anstellen zu können. Es wurden also die Bohnen nach der Bestrahlung in Akkumulatorengläser gepflanzt, 6 Stück in ein Glas, das mit entsprechend gefaltetem Filtrierpapier innen ausgekleidet und mit feuchtem Sägemehl aufgefüllt war. Durch sechs entsprechende Oeffnungen, am obern Rande des Filtrierpapiers, wurden die Bohnen in der Weise eingelegt, daß ihre Wurzeln durch diese Oeffnungen, je einem Glasstabe entlang, wachsen konnten. Damit wurde erreicht, daß das tägliche Wachstum durch das Glas genau beobachtet werden konnte. Die eingebetteten Bohnen schützten wir

durch eine feuchte Sägemehlschicht vor der Austrocknung. Nach der Einpflanzung bewahrten wir die Bohnen vor direktem Sonnenlicht und stellten sie im Hintergrund des Aufbewahrungsraumes auf. Während sieben Tagen wurde das Wachstum beobachtet und täglich zur gleichen Zeit gemessen. Anschließend wurden alle mit dem gleichen Quantum Wasser übergossen.

Das Radium wurde vom Institut der bernischen Radiumstiftung zur Verfügung gestellt.

IV. Resultate

Um unsere zahlreichen Messungen in ein übersichtliches Bild zu fassen, ist eine Zusammenstellung der einzelnen Serienwerte und ihre Auftragung in ein Koordinatensystem notwendig. Die Verbindung der entsprechenden Werte der einzelnen Tage ergeben Kurven, aus denen leicht ersichtlich ist, welche Dosen, im Vergleich zu den unbestrahlten Kontrollen, eine Förderung des Wachstums und welche eine Hemmung bewirken.

Die Wirkung der Strahlen äußert sich am auffälligsten im veränderten Längenwachstum der Hauptwurzel. Ob andere Vorgänge noch als Folge der Strahlung zu deuten sind, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. Trotz der sorgfältigen Auslese der Versuchsobjekte gibt es innerhalb einer, mit der gleichen Dosis bestrahlten Serie von Bohnen doch starke individuelle Schwankungen im Längenwachstum, die im Resultat berücksichtigt werden müssen. Zur Berechnung des mittleren Fehlers hat Gauß folgende Formel angegeben:

$$\text{Mittlerer Fehler} = \pm \sqrt{\frac{\Sigma \triangle^2}{n\ (n-1)}}$$

wobei $\triangle$: Unterschied der Einzellänge zur Durchschnittslänge ist.
n : Anzahl der Versuchsserien.

Nach Tabelle 1 beträgt der mittlere Fehler in den Versuchen mit β-Strahlen $\pm 0{,}21$.

Für die γ-Strahlen hingegen liegt er laut Tabelle 3 etwas höher, nämlich: $F = \pm 0{,}32$. Der Grund dieses relativ hohen mittleren Fehlers ist in der beschränkten Anzahl der Einzelversuche zu suchen.

Diskussion der Versuche mit β-Strahlen

(Tabellen und Kurven 1 und 2)

Betrachten wir die Tabellen und Kurven der β-Strahlenversuche zuerst in der Uebersicht, so fällt uns vor allem auf, daß das Längenwachstum bei kleinen Dosen, gegenüber den Kontrollpflanzen, beschleunigt, das bei größeren Dosen gehemmt ist. Ferner lassen die Kurven einen S-förmigen Verlauf erkennen. Die geringe Verschiedenheit im Wachstum der bestrahlten Bohnen gegenüber den unbestrahlten am ersten Tage läßt auf eine weitgehende Aehnlichkeit des Ausgangsmaterials schließen.

Die verschiedenen Dosen-Gruppen sind im Folgenden noch einzeln betrachtet:

5 r: Diese sehr kleine Strahlenmenge beschleunigt das Wachstum in den ersten zwei Tagen nur wenig. Die Zeitdauer, in der die Wirkung der Strahlen noch nicht manifest ist, wird als Latenzzeit bezeichnet. Die Wachstumssteigerung ist im Verlauf des 3. Tages verhältnismäßig stark, und flacht sich dann allmählich ab. Vom maximalen Werte ab, der am 5. Tage erreicht wird, neigt die Kurve wieder der Kontrolle zu. Der 7. Tag zeigt eine leichte Erholung.

10 r: Die Latenzzeit reicht auch hier bis zum 2. Tage. Dann aber beginnt die reizende Wirkung der Strahlung manifest zu werden in einer erheblichen Steigerung des Wachstums. Bis zum 5. Tage steigen die Werte ständig an, erreichen hier ihr Maximum und fallen nur sehr wenig ab, so daß sie am letzten der Beobachtungstage noch beträchtlich über dem Mittelwert der unbestrahlten Pflanzen stehen. Der ganze Kurvenverlauf zeigt eindeutig, daß 10 r die optimale Reizdosis darstellt.

25 r: Hier ist die Reizwirkung zu Beginn schon so groß, daß die Latenzzeit sehr kurz wird. Der Maximalwert fällt auf den ersten Tag,

so daß die Kurve schon von Anfang an fallenden Charakter aufweist; sie mag sich allerdings bis zum 3. Tage noch über der Kontrolle zu halten. Die folgenden Tage zeigen aber unverkennbar die Gegenreaktion dieser Frühreizung in einer Schädigung, die zuletzt wieder n einen leichten Anstieg übergeht.

60 r: Am 1. Tage zeigt diese Serie kaum eine Verschiedenheit gegenüber den unbestrahlten Keimlingen. Die Latenzzeit ist sehr kurz, denn die Schädigung macht sich am 2. Tage schon in hohem Maße bemerkbar, und nimmt auch in der folgenden Zeit noch stark zu, um am 5. Tage den Maximalwert zu erreichen. Der 6. Tag zeigt einen erheblichen Anstieg im Wachstum, der zuletzt wieder auf einen höheren Hemmungswert zurücksinkt.

100 r: Die Wachstumsschädigung nimmt in den ersten fünf Tagen ganz gewaltig zu, erreicht dann ihren Höchstwert, um am 6. Tage ebenso rasch eine Steigerung im Wachstum eintreten zu lassen.

Die graphische Darstellung 2 zeigt die Verhältnisse noch deutlicher als Darstellung 1, weil hier die Werte der Kontrollpflanzen an sämtlichen Tagen = 1,0 aufgetragen sind (K). Es lassen sich die Wirkungen der verschiedenen Dosen auf diese Weise im Kurvenbild besser herausheben.

Daraus läßt sich besonders gut die interessante Tatsache ersehen, daß die Wirkung der Bestrahlung am Anfang der Beobachtungszeit am intensivsten ist; bei den kleinen Reizdosen am 3. Tag, bei den höheren Schädigungsdosen am 2. Tag, und daß nachher eine Abflachung folgt bis zum 5. Tag, der für alle Dosen das Maximum aufweist.

Das größte Interesse am ganzen Versuche liegt in der Frage: Haben kleine Dosen von β-Strahlen eine wachstumfördernde Wirkung auf unser Objekt? Darauf antworten unsere Resultate, indem sie deutlich erkennen lassen, daß Strahlenmengen von 5—25 r das Wachstum tatsächlich beschleunigen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der Resultate für *β-Strahlen* über das tägliche Längenwachstum der Hauptwurzel in mm als Mittelwert aus 10 Versuchen.

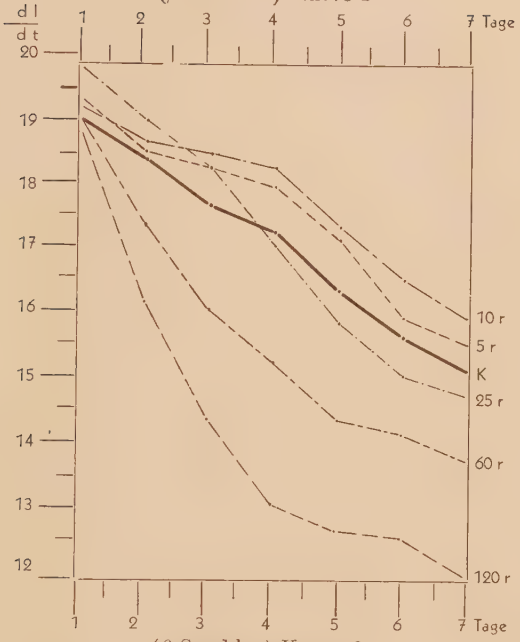
Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	5 r	10 r	25 r	60 r	120 r
1. Tag	19,0	19,3	19,2	19,8	19,0	18,8
	0,16	0,17	0,26	0,20	0,15	0,41
2. Tag	18,4	18,5	18,6	19,0	17,4	16,2
	0,15	0,18	0,19	0,18	0,16	0,29
3. Tag	17,7	18,3	18,5	18,3	16,1	14,4
	0,19	0,15	0,16	0,23	0,15	0,16
4. Tag	17,3	18,0	18,3	17,1	15,3	13,1
	0,22	0,16	0,19	0,31	0,17	0,16
5. Tag	16,4	17,2	17,4	15,9	14,4	12,7
	0,25	0,25	0,28	0,26	0,19	0,30
6. Tag	15,7	16,0	16,6	15,1	14,2	12,6
	0,16	0,23	0,27	0,30	0,13	0,24
7. Tag	15,2	15,6	16,0	14,8	13,3	12,0
	0,17	0,17	0,17	0,21	0,16	0,22

Tabelle 2: Zusammenstellung der Verhältniszahlen des Tageswachstums bestrahlter Bohnen zu unbestrahlten Kontrollen für β-*Strahlen*, wobei der Kontrollwert = 1,00 ist.

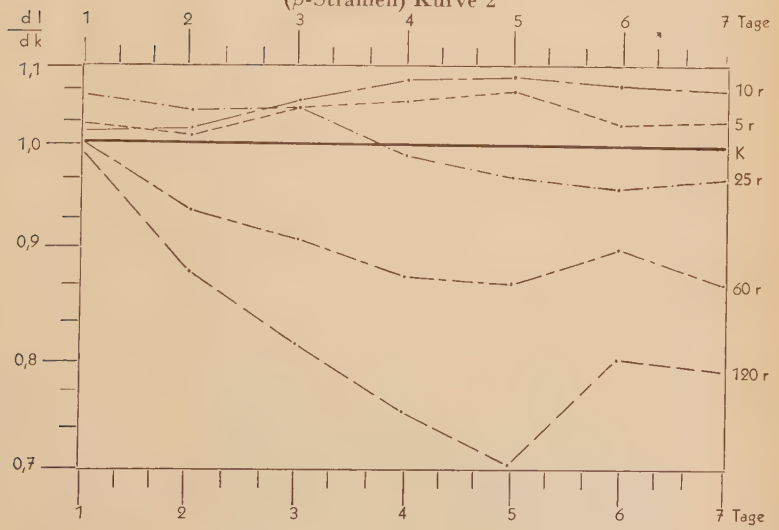
Tage nach der Bestrahlung	5 r	10 r	25 r	60 r	120 r
1. Tag	1,015	1,01	1,04	1,0	0,99
2. Tag	1,005	1,01	1,03	0,945	0,88
3. Tag	1,034	1,04	1,034	0,91	0,815
4. Tag	1,04	1,058	0,99	0,885	0,75
5. Tag	1,05	1,061	0,97	0,87	0,70
6. Tag	1,02	1,057	0,96	0,904	0,80
7. Tag	1,026	1,052	0,97	0,87	0,79

Graphische Darstellung

(β-Strahlen) Kurve 1



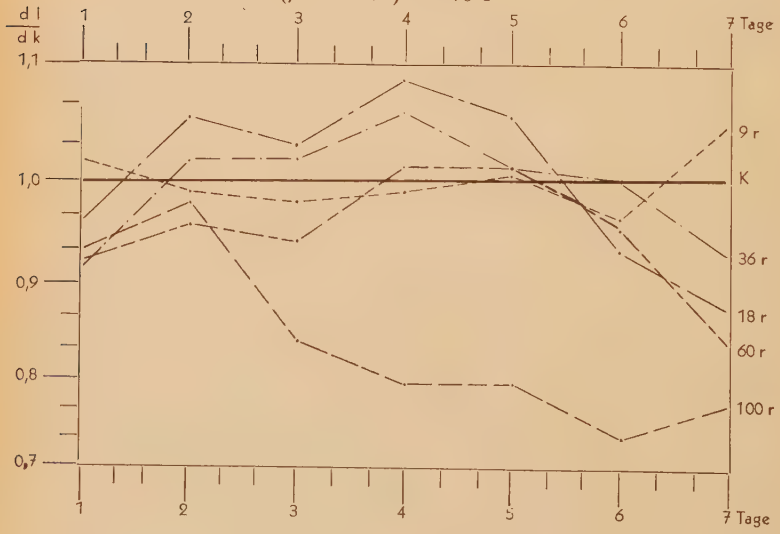
(β-Strahlen) Kurve 2



Graphische Darstellung

(γ-Strahlen) Kurve 3

(γ-Strahlen) Kurve 4



Diskussion der Versuche mit γ-Strahlen

(Tabellen und Kurven 3 und 4)

Für die γ - Strahlen sind die Ergebnisse, gegenüber den β - Strahlen, nur in dem Sinne verändert, daß hier die Reizwirkung erst bei etwas größeren Dosen eintritt, und daß auch erst bei höheren Strahlenmengen die Schädigung sichtbar ist. Das Charakteristische der einzelnen Kurven ist anschließend noch speziell hervorgehoben:

9 r: Der Kurvenverlauf weicht nicht stark von dem der Kontrollpflanzen ab; mit andern Worten: die Dosis ist noch zu klein, um eine Reizung zu bewirken.

18 r: Nach kurzer Latenzzeit beginnt hier am 2. Tage schon die Reizwirkung in einer starken Steigerung im Wachstum manifest zu werden. Ein weiterer Anstieg der Kurve zeigt sich am 4. Tage, um in diesem Zeitpunkt auch das Maximum zu erreichen. Es folgt ein steiler Abfall, der wahrscheinlich als Gegenreaktion der vorausgegangenen Intensivierung im Wachstum zu werten ist.

36 r: Hier verläuft der ganze Reizungseffekt weniger energisch, wie bei der halben Reizdosis. Wohl ist die anfängliche Wachstumsförderung ganz erheblich, doch sie flacht sich am 3. Tage auf Wachstumskonstanz ab. Der Maximalwert fällt auch auf den 4. Tag. Er liegt, entsprechend dem übrigen Verhalten der Kurve, bedeutend niedriger als bei der 18 r - Kurve. Infolge der mäßigen Reizung fallen die Werte nur ganz allmählich ab, so daß eine Schädigung erst am letzten Tage sichtbar wird.

60 r: In den ersten drei Tagen tritt kaum eine Veränderung im Wachstum ein. Dann aber macht sich die Strahlenwirkung als Reizung geltend, denn der Kurvenverlauf liegt am 4.—5. Tage über dem der unbestrahlten Bohnen. Dieser schwachen Förderung im Wachstum folgt bald eine Hemmung, die sich bis zum letzten Tage ständig erhöht.

100 r: Vom 2. Tage ab zeigt sich hier während der ganzen Beobachtungszeit eine Schädigung, die sich am 3. Tage sehr stark bemerkbar macht, um sich allmählich zu verflachen.

In einem vergleichenden Ueberblick läßt sich eine Verschiedenheit gegenüber den β - Strahlen erkennen. Die Reizdosen wirken bei den γ - Strahlen über eine kürzere Zeitdauer als bei den β - Strahlen. Daraus erklärt sich die interessante Tatsache, daß die Maximalwerte für die Reizdosen schon auf den 4. Tag fallen, und daß nachher die Schädigung sehr rasch eintritt.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Resultate für γ - *Strahlen* über das tägliche Längenwachstum der Hauptwurzel in mm, als Mittelwert aus sechs Versuchen.

Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	9 r	18 r	36 r	60 r	100 r
1. Tag	16,9	17,2	16,3	15,5	15,6	16,4
	0,21	0,28	0,39	0,38	0,46	0,25
2. Tag	14,9	14,8	15,9	15,3	14,4	14,8
	0,21	0,19	0,27	0,21	0,36	0,11
3. Tag	15,3	15,0	16,2	15,9	14,5	13,0
	0,33	0,12	0,28	0,37	0,20	0,29
4. Tag	14,1	14,0	15,4	15,0	14,3	11,5
	0,30	0,30	0,31	0,38	0,13	0,23
5. Tag	13,2	13,3	14,0	13,3	13,3	10,8
	0,45	0,42	0,40	0,43	0,53	0,37
6. Tag	13,2	12,2	12,3	13,2	12,7	10,0
	0,35	0,41	0,40	0,30	0,54	0,34
7. Tag	12,7	13,4	11,1	11,9	10,7	10,9
	0,44	0,36	0,38	0,48	0,30	0,39

Tabelle 4: Zusammenstellung der Verhältniszahlen des Tageswachstums bestrahlter Bohnen zu unbestrahlten Kontrollen für γ - *Strahlen*, wobei der Kontrollwert = 1,00 ist.

Tage nach der Bestrahlung	9 r	18 r	36 r	60 r	100 r
1. Tag	1,02	0,965	0,92	0,925	0,97
2. Tag	0,99	1,06	1,02	0,96	0,98
3. Tag	0,98	1,035	1,02	0,945	0,85
4. Tag	0,995	1,095	1,065	1,015	0,81
5. Tag	1,003	1,06	1,01	1,01	0,81
6. Tag	0,965	0,935	0,99	0,96	0,76
7. Tag	1,05	0,88	0,93	0,845	0,79

Tabelle 5. Anzahl der Bohnen mit Seitenwurzeln in % der Gesamtzahl.

A. Versuch mit β- Strahlen

Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	5 r	10 r	25 r	60 r	120 r
5. Tag	43,16	41,86	28,21	25,48	21,58	18,72
6. Tag	47,31	40,91	55,51	60,06	63,91	47,84
7. Tag	7,47	6,37	5,46	11,83	9,96	13,52

B. Versuch mit γ - Strahlen

Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	9 r	18 r	36 r	60 r	100 r
5. Tag	48,65	30,58	30,58	9,73	—	2,78
6. Tag	45,27	57,38	63,55	66,72	31,97	22,24
7. Tag	5,56	4,17	5,56	12,51	19,46	31,97

In beiden Versuchen zeigen die Kontrollen im Auftreten der Seitenwurzeln ungefähr die gleiche prozentuale Verteilung auf den 5. und 6. Tag, während bei den bestrahlten Bohnen die weitaus größere Anzahl erst am 6. Tage auftritt. Bei höheren Dosen ist der hemmende Einfluß der Strahlen auf die Bildung von Seitenwurzeln deutlich sichtbar.

Tabelle 6. Anzahl der Bohnen mit Nekrose der Wurzel-spitze in % der Gesamtzahl.

A. Versuch mit β - Strahlen

Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	5 r	10 r	25 r	60 r	120 r
5. Tag	7,47	5,46	11,83	6,37	6,64	9,36
6. Tag	8,3	12,74	8,19	14,45	12,45	18,72
7. Tag	13,28	10,92	10,92	15,47	15,47	12,48

B. Versuch mit γ - Strahlen

Tage nach der Bestrahlung	Kontrolle	9 r	18 r	36 r	60 r	100 r
5. Tag	2,78	2,78	1,39	1,39	1,39	1,39
6. Tag	12,51	8,34	12,51	12,51	7,95	4.17
7. Tag	11,12	15,68	19,46	9,73	7,95	15.29

Es läßt sich keine Beziehung zwischen dem Auftreten der Nekrosen und der Bestrahlung finden. Man muß diese Erscheinung in einer gewissen Disposition des Individuums suchen.

Zusammenfassung

Durch unsere Untersuchungen sind wir zu folgenden prinzipiellen Ergebnissen gelangt:

Unser Objekt (Vicia faba equina) reagierte im wesentlichen auf beide Strahlenarten (β - und γ - Strahlen des Radiums) gleich, bei kleinen Dosen mit einer Stimulierung, bei größeren mit einer Hemmung des Wachstums. Ein verschiedenes Verhalten zeigte sich nur darin, daß bei γ - Strahlen, im Vergleich zu den β - Strahlen, entsprechende Wirkungen erst bei höheren Strahlenmengen auftreten. Bei den β - Strahlen tritt die optimale Reizung bei 10 r, und die erste deutliche Schädigung bei 60 r auf, während die entsprechenden Wirkungen bei γ - Strahlen erst bei 18 r beziehungsweise 100 r sichtbar werden. Diese Tatsache dürfte mit dem Zeitfaktor im Zusammenhang stehen.

Beide Strahlenarten haben ferner eine hemmende Wirkung auf die Bildung von Seitenwurzeln.

Literaturverzeichnis

[1]) *H. Holthusen* und *R. Braun:*
Grundlagen der Röntgenstrahlung. Leipzig 1933.

[2]) *A. Liechti, W. Minder* und *J. H. Müller:*
Strahlenbiologische Versuche mit Drosophila-Puppen.
Strahlen-Therapie Bd. 63, 1938, S. 684.

[3]) *R. Glocker, F. Hayer* und *O. Jüngling:*
Ueber die biologische Wirkung verschiedener Röntgenstrahlenqualitäten bei Dosierung in R-Einheiten.
Str. Th. Bd. 32, 1929, S. 1.

[4]) *H. Iven:*
Neuere Untersuchungen über die Wirkung der Röntgenstrahlen auf Pflanzen.
Str. Th. Bd. 19, 1925, S. 413.

[5]) *R. Kirschner:*
Einfluß der Radiumstrahlung auf die Nachkommen von Aphiden.
Str. Th. Bd. 46, 1933, S. 663.

[6]) *P. Zacharias:*
Ueber den Einfluß der rhythmischen Unterbrechung der Röntgenstrahlung auf das biologische Objekt.
Str. Th. Bd. 59, 1937, S. 224.

[7]) *W. Minder:*
Radiologische Rundschau VII. 1938, S. 346.

[8]) *A. Salzmann*, Diss. 1940.

[9]) *K. Dölken*, Diss. 1940.